

Stromortskurve Asynchronmaschine



Stromortskurve der Drehstrom-Asynchronmaschine mit
kurzgeschlossenem Rotor beim Betrieb am Drehstromnetz mit
fester Frequenz und Spannung
Prof. Dr.-Ing. Carsten Fräger

Inhaltsverzeichnis

- 1 Übersicht
- 2 Ersatzschaltbild und Spannungsgleichung
- 3 Ortskurve mit konstanten Ersatzschaltbildelementen
- 4 Stromortskurve Beispiel MCA26 - 55 kW
- 5 Stromortskurve Beispiel IEC 080 - 0,75 kW
- 6 Stromortskurve Beispiel IEC 180 - 22 kW
- 7 Stromverdrängung im Rotor
- 8 Stromortskurve mit Stromverdrängung

Übersicht

- Die Stromortskurve beschreibt das Verhalten der Asynchronmaschine in Abhängigkeit vom Schlupf s und damit von der Drehzahl n .

$$n = (1 - s) \cdot n_0 = (1 - s) \cdot \frac{f_S}{p} \quad (1)$$

$$s = \frac{f_R}{f_S} \quad , \quad f_R = s \cdot f_S \quad (2)$$

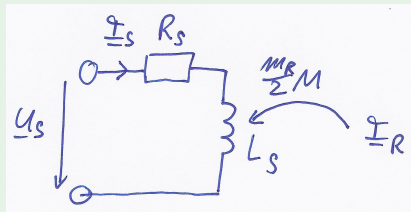
- Sie enthält den Statorstrom \underline{I}_S , den transformierten Rotorstrom \underline{I}'_R , das Drehmoment M , die mechanische Leistung P_{mech} , die Rotorverlustleistung P_{VR} , die Statorverlustleistung P_{VS} und die Statorleistung P_S .

Übersicht

Randbedingungen

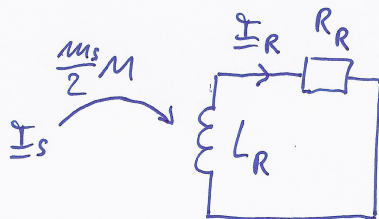
- Symmetrischer Betrieb am Drehstromnetz fester Statorstrangspannung U_S und Statorfrequenz f_S
- nur Grundfeldverhalten
- keine Sättigung
- Reibung vernachlässigt $M_{\text{reib}} \approx 0$
- Eisenverluste vernachlässigt $P_{\text{fe}} \approx 0$
- Basis ist das einsträngige Ersatzschaltbild (ESB).

Ersatzschaltbild (ESB) Stator, Frequenz f_s



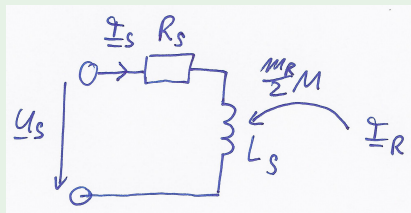
$$\begin{aligned} U_s &= R_s \cdot I_s \\ &+ j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot L_s \cdot I_s \\ &- j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot \frac{m_R}{2} \cdot M \cdot I_R \end{aligned} \quad (3)$$

Ersatzschaltbild (ESB) Rotor, $f_R = s \cdot f_s$



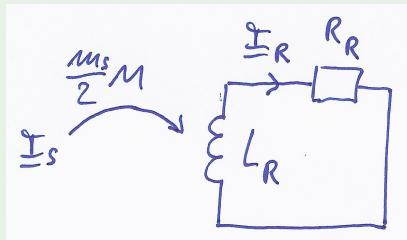
$$\begin{aligned} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot \frac{m_s}{2} \cdot M \cdot I_s &= \\ j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot L_R \cdot I_R \\ &+ R_R \cdot I_R \end{aligned} \quad (4)$$

Ersatzschaltbild (ESB) Stator, Frequenz f_S



$$\begin{aligned} U_S &= R_S \cdot I_S \\ &+ j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot I_S \\ &- j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_R}{2} \cdot M \cdot I_R \end{aligned} \quad (3)$$

Ersatzschaltbild (ESB) Rotor, $f_R = s \cdot f_S$



$$\begin{aligned} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot I_S &= \\ j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot L_R \cdot I_R \\ &+ R_R \cdot I_R \end{aligned} \quad (4)$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (2)

- Spannungsgleichung Rotor mit der Frequenz $\frac{f_R}{s} = f_S$:

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot L_R \cdot \underline{I}_R + R_R \cdot \underline{I}_R$$

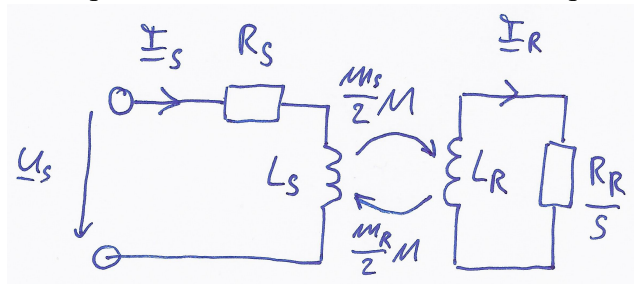
$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_R}{s} \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_R}{s} \cdot L_R \cdot \underline{I}_R + \frac{R_R}{s} \cdot \underline{I}_R$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_R \cdot \underline{I}_R + \frac{R_R}{s} \cdot \underline{I}_R \quad (5)$$

- Spannungsgleichung mit Statorfrequenz $f_S \rightarrow$ einfrequentes Ersatzschaltbild

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (3)

- einfrequentes Ersatzschaltbild mit Statorfrequenz f_s

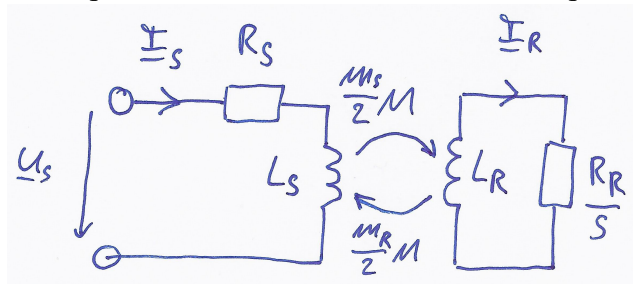


$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot \underline{I}_S - j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_R}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_R$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_R \cdot \underline{I}_R + \frac{R_R}{s} \cdot \underline{I}_R$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (3)

- einfrequentes Ersatzschaltbild mit Statorfrequenz f_S



$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot \underline{I}_S - j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_R}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_R$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot \frac{m_S}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_R \cdot \underline{I}_R + \frac{R_R}{s} \cdot \underline{I}_R$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (4)

- Transformation des Rotorstroms $I'_R = \ddot{u} \cdot \underline{I}_R$, so dass gilt:

$$\frac{m_R}{2} \cdot M \cdot \frac{1}{\ddot{u}} = L_S \Rightarrow \ddot{u} = \frac{m_R M}{2 L_S} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \frac{m_R}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_R \\ &= \underbrace{\frac{m_R}{2} \cdot M \cdot \frac{1}{\ddot{u}}}_{L_S} \cdot \underbrace{\ddot{u} \cdot \underline{I}_R}_{I'_R} \\ &= L_S \cdot I'_R \end{aligned} \quad (7)$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (5)

- Spannungsgleichung Stator mit transformiertem Rotorstrom

$$\underline{I}'_{\text{R}} = \ddot{u} \cdot \underline{I}_{\text{R}}:$$

$$\underline{I}_{\text{R}} = \frac{\underline{I}'_{\text{R}}}{\ddot{u}}$$

$$\underline{U}_{\text{S}} = R_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} + \text{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}}$$

$$- \text{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot \frac{m_{\text{R}}}{2} \cdot M \frac{1}{\ddot{u}} \cdot \underline{I}'_{\text{R}}$$

$$\underline{U}_{\text{S}} = R_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} + \text{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} - \text{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot \underline{I}'_{\text{R}}$$

$$\underline{U}_{\text{S}} = R_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} + \text{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot (\underline{I}_{\text{S}} - \underline{I}'_{\text{R}}) \quad (8)$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (6)

- Spannungsgleichung Rotor mit transformiertem Rotorstrom

$$\underline{I}'_{\text{R}} = \ddot{u} \cdot \underline{I}_{\text{R}}:$$

$$\underline{I}_{\text{R}} = \frac{\underline{I}'_{\text{R}}}{\ddot{u}}$$

$$\mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot \frac{m_{\text{S}}}{2} \cdot M \cdot \underline{I}_{\text{S}} = \mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{R}} \cdot \frac{\underline{I}'_{\text{R}}}{\ddot{u}} + \frac{R_{\text{R}}}{s} \cdot \frac{\underline{I}'_{\text{R}}}{\ddot{u}} \quad \left| \cdot \frac{2L_{\text{S}}}{m_{\text{S}}M} \right.$$

$$\mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} = \mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot \underbrace{L_{\text{R}} \frac{2L_{\text{S}}}{m_{\text{S}}M \ddot{u}}}_{L'_{\text{R}}} \cdot \underline{I}'_{\text{R}} + \underbrace{\frac{R_{\text{R}}}{\ddot{u}} \frac{2L_{\text{S}}}{m_{\text{S}}M}}_{R'_{\text{R}}} \cdot \frac{1}{s} \cdot \underline{I}'_{\text{R}}$$

$$\mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L_{\text{S}} \cdot \underline{I}_{\text{S}} = \mathrm{j} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{S}} \cdot L'_{\text{R}} \cdot \underline{I}'_{\text{R}} + \frac{R'_{\text{R}}}{s} \cdot \underline{I}'_{\text{R}} \quad (9)$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (7)

- Spannungsgleichung Rotor mit Induktivität $L_K = L'_R - L_S$:

$$L'_R = L_S + L_K$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L'_R \cdot \underline{I}'_R + \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot \underline{I}_S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot (L_S + L_K) \cdot \underline{I}'_R + \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R$$

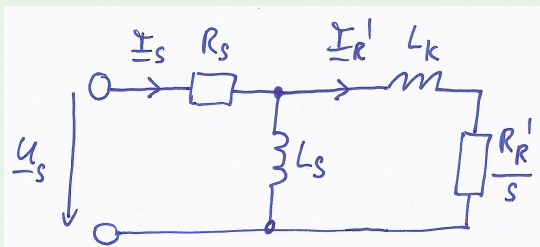
$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot (\underline{I}_S - \underline{I}'_R) = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_K \cdot \underline{I}'_R + \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R \quad (10)$$

Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (8)

Spannungsgleichungen Stator und Rotor

$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot (\underline{I}_S - \underline{I}'_R)$$

$$j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S \cdot (\underline{I}_S - \underline{I}'_R) = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_K \cdot \underline{I}'_R + \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R$$



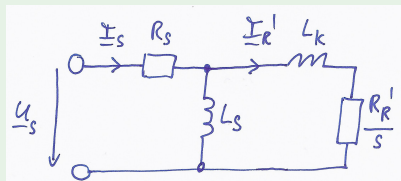
Ersatzschaltbild und Spannungsgl. (9)

Spannungsgleichungen mit Reaktanzen

- $X_K = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_K$
- $X'_R = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L'_R$
- $X_S = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S$

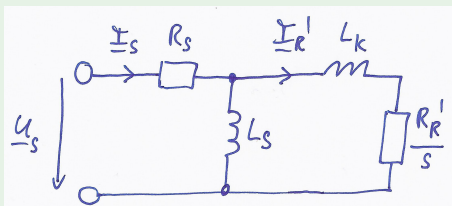
$$\underline{U}_S = R_S \cdot \underline{I}_S + jX_S \cdot (\underline{I}_S - \underline{I}'_R)$$

$$jX_S \cdot (\underline{I}_S - \underline{I}'_R) = jX_K \cdot \underline{I}'_R + \frac{R'_R}{s} \cdot \underline{I}'_R$$



Zusammenfassung ESB, Spannungsgl.

- Das Ersatzschaltbild mit R_S , L_S , L_K bzw. X_S , X_K und $\frac{R'_R}{s}$ beschreibt das Grundfeldverhalten der Asynchronmaschine in Abhängigkeit vom Schlupf s .
- Der Rotorstrom wird dabei in den Stator transformiert: Frequenz f_S , Widerstand R'_R .
- Die Transformation funktioniert unabhängig von der Rotorstrangzahl z.B. auch für Käfigläufer.



$$X_S = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S$$

$$X_K = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_K$$

Stromortskurve (1)

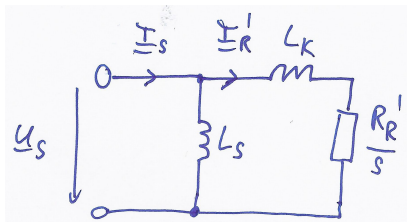
- Spannungsgleichungen für Rotor und Stator werden nach dem Statorstrom aufgelöst.
- Bezugsgröße ist reelle Statorspannung: $\underline{U}_S = U_S$

$$\begin{aligned}\underline{I}_S &= \frac{U_S}{R_S + \frac{jX_S \cdot \left(jX_K + \frac{R'_R}{s}\right)}{jX_S + jX_K + \frac{R'_R}{s}}} \\ &= \frac{jX_S + jX_K + \frac{R'_R}{s}}{R_S \cdot \left(jX_S + jX_K + \frac{R'_R}{s}\right) + jX_S \cdot \left(jX_K + \frac{R'_R}{s}\right)} U_S\end{aligned}\quad (11)$$

Stromortskurve (2)

- zunächst Vernachlässigung des Statorwiderstandes: $R_S = 0$
- → vereinfachtes Ersatzschaltbild und vereinfachte Gleichung für Strom \underline{I}_S

Stromortskurve (3)



$$X_S = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_S$$

$$X_K = 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot L_K$$

$$\underline{I}_S = \frac{jX_S + jX_K + \frac{R'_R}{s}}{jX_S \cdot \left(jX_K + \frac{R'_R}{s}\right)} U_S = \frac{U_S}{jX_S} + \frac{U_S}{jX_K + \frac{R'_R}{s}} = \frac{U_S}{jX_S} + \underline{I}'_R \quad (12)$$

Stromortskurve (4)

vernachlässigbarer Statorwiderstand $R_S \approx 0$

- Statorstrom \underline{I}_S verläuft auf Kreis (s.u.)
- Mittelpunkt des Kreises: $\underline{A} = \frac{U_S}{jX_S} + \frac{1}{2} \frac{U_S}{jX_K}$ auf der imaginären Achse.
- Punkte bei $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$:

$$s = 0 \Rightarrow \frac{R'_R}{s} \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{jX_S} \quad (13)$$

$$s \rightarrow \infty \Rightarrow \frac{R'_R}{s} \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{jX_S} + \frac{U_S}{jX_K} \quad (14)$$

Stromortskurve (5)

- Verlauf auf Kreis:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_S - \underline{A} &= \frac{U_S}{jX_S} + \frac{U_S}{jX_K + \frac{R'_R}{s}} - \frac{U_S}{jX_S} - \frac{1}{2} \frac{U_S}{jX_K} = \frac{U_S}{jX_K + \frac{R'_R}{s}} - \frac{1}{2} \frac{U_S}{jX_K} \\
 &= U_S \left(\frac{j2X_K}{\left(jX_K + \frac{R'_R}{s}\right)j2X_K} - \frac{jX_K + \frac{R'_R}{s}}{\left(jX_K + \frac{R'_R}{s}\right)j2X_K} \right) = \frac{U_S}{j2X_K} \frac{jX_K - \frac{R'_R}{s}}{jX_K + \frac{R'_R}{s}} \\
 \Rightarrow |\underline{I}_S - \underline{A}| &= \frac{U_S}{2X_K} \frac{\left|jX_K - \frac{R'_R}{s}\right|}{\left|jX_K + \frac{R'_R}{s}\right|} = \frac{U_S}{2X_K} = \text{konst} \Rightarrow \text{Kreis}
 \end{aligned}$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (1)

- Motor MCA26
- $P_N = 55 \text{ kW}$, $n_N = 1280 \frac{1}{\text{min}}$, $U_N = 340 \text{ V}$, $f_N = 44 \text{ Hz}$,
 $I_N = 115,5 \text{ A}$, $s_N = 0,0303$
- $R_S = 0,055 \Omega \approx 0$, $L_S = 17,4 \text{ mH}$, $L_K = 0,430 \text{ mH}$, $R'_R = 55,2 \text{ m}\Omega$



Stromortskurve Beispiel MCA26 (2)

- Kreis mit Mittelpunkt auf imaginärer Achse
- Punkte für $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ reichen zur Konstruktion

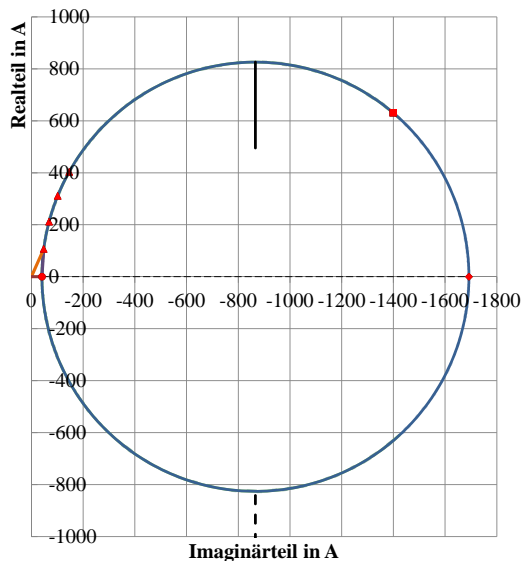
$$s = 0 \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{jX_S} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{j2\pi f_N L_S}$$

$$= -j \frac{196 \text{ V}}{2\pi \cdot 44 \text{ Hz} \cdot 0,0174 \text{ H}} = -j40,9 \text{ A}$$

$$s \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{jX_S} + \frac{U_S}{jX_K} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{j2\pi f_N L_S} + \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{j2\pi f_N L_K}$$

$$= -j40,9 \text{ A} - j \frac{196 \text{ V}}{2\pi \cdot 44 \text{ Hz} \cdot 0,00043 \text{ H}} = -j1692 \text{ A}$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (3)



— Statorstrom I_s Variation

— Statorstrom I_s



♦ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$



■ Anlaufstrom I_a , $s=1$

— Bemessungsrotorstrom $I_{m'}$

$R_S = 0$



▲ $s_n, 2 s_n, 3 s_n, 4 s_n$

— Kippunkt motorisch

- - Kippunkt generatorisch

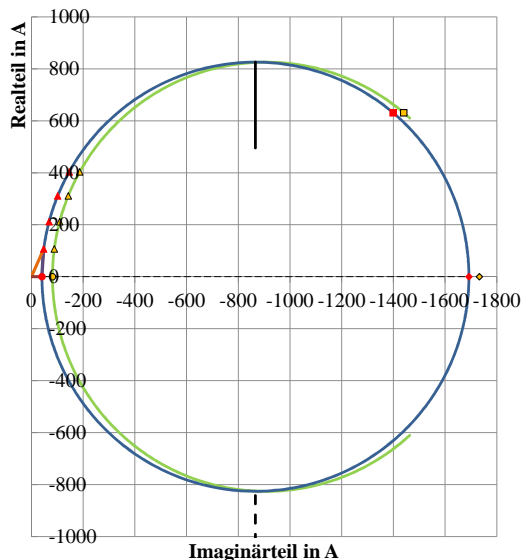
— Bemessungsstrom I_n



• Leerlaufstrom I_0 , $s=0$

— Leerlaufstrom I_0

Stromortskurve Beispiel MCA26 (4)



— Statorstrom I_s Variation

— Statorstrom I_s



♦ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$



■ Anlaufstrom I_a , $s=1$

— Bemessungsrotorstrom $I_{rm'}$



▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$

— Kippunkt motorisch

- - Kippunkt generatorisch

— Bemessungsstrom I_n

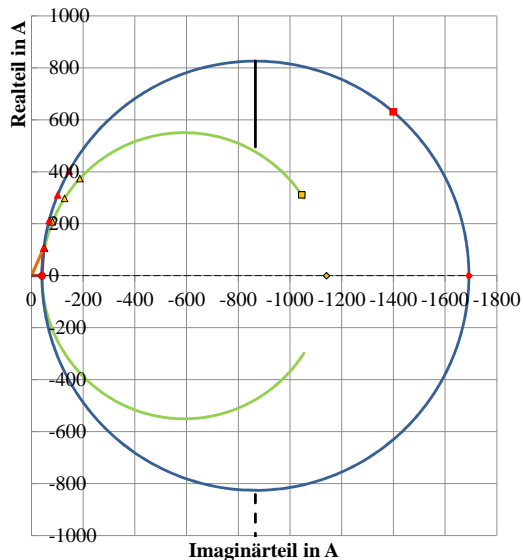


• Leerlaufstrom I_0 , $s=0$

— Leerlaufstrom I_0

$$R_S = 0 \\ 0,5 \cdot L_S$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (5)



— Statorstrom I_s Variation

— Statorstrom I_s



♦ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$



■ Anlaufstrom I_a , $s=1$

— Bemessungsrotorstrom $I_{rm'}$



▲ $s_n, 2 s_n, 3 s_n, 4 s_n$

— Kippunkt motorisch

- - Kippunkt generatorisch

— Bemessungsstrom I_n

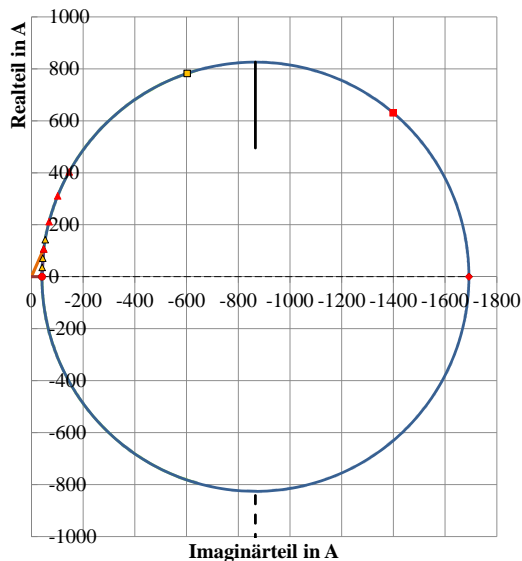


• Leerlaufstrom I_0 , $s=0$

— Leerlaufstrom I_0

$$R_S = 0 \\ 1,5 \cdot L_K$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (6)



— Statorstrom I_s Variation

— Statorstrom I_s



♦ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$



■ Anlaufstrom I_a , $s=1$

— Bemessungsrotorstrom $I_{m'}$



▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$

— Kippunkt motorisch

- - Kippunkt generatorisch

— Bemessungsstrom I_n



• Leerlaufstrom I_0 , $s=0$

— Leerlaufstrom I_0

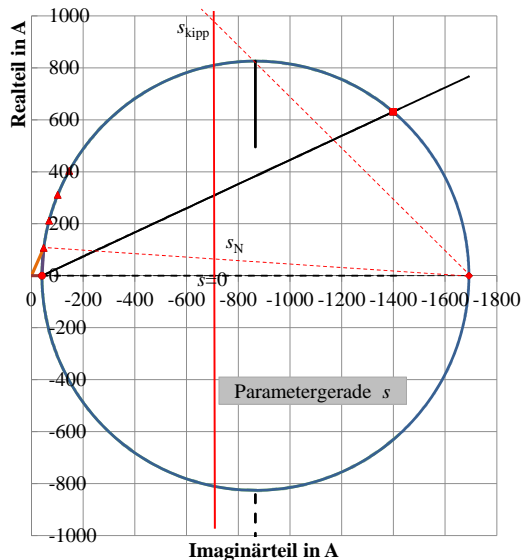
$$R_S = 0 \\ 3,0 \cdot R'_R$$

Stromortskurve Parametergerade

Parametergerade

- Parametrierung mit Schlupf s .
- jede Parallele zur Tangente im Punkt $s \rightarrow \infty$ ist Parametergerade mit linearer Teilung für s
- bei $R_S = 0$ ist die Parametergerade senkrecht zur Imaginärachse

Stromortskurve Beispiel MCA26 (7)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie
- - - Drehmomentlinie
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◆
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
-
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom $I_{rm'}$
- ▲
- ▲ s_n , $2 s_n$, $3 s_n$, $4 s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

$R_S = 0$

Stromortskurve Drehmoment

- Drehmoment M : Die gesamte Leistung wird in den Läufer übertragen, da $R_S \approx 0$:

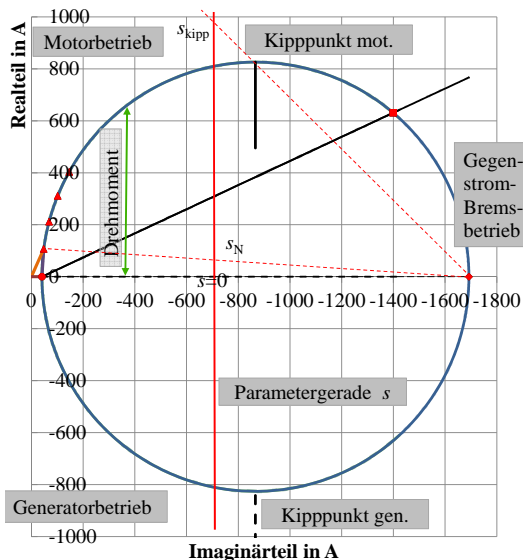
$$P_\delta = 2 \cdot \pi \cdot n_0 \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_S}{p} \cdot M = P_S = m_S \cdot U_S \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_S)$$

Drehmoment in der SOK für $R_S = 0$

- Imaginärachse ist Drehmomentlinie, senkrechter Abstand zwischen Imaginärachse und Stromortskurve ist Maß für das Drehmoment
- Maximaldrehmoment im Scheitelpunkt der Stromortskurve → Kipppunkt

$$M = \frac{p \cdot m_S \cdot U_S}{2 \cdot \pi \cdot f_S} \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_S) \quad (15)$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (8)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie
- - - Drehmomentlinie
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste

$$R_S = 0$$

- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom $I_{m'}$
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

Stromortskurve Rotorverluste (1)

- Rotorverluste P_{VR} und mechanische Leistung P_{mech} ergeben zusammen die Luftspaltleistung:

$$P_{mech} = P_{\delta} - P_{VR} \quad (16)$$

- Rotorverluste:

$$P_{VR} = m_S \cdot R'_R \cdot I'^2_R \quad (17)$$

Stromortskurve Rotorverluste (2)

- Rotorverluste aus Kreisform der Stromortskurve mit
 - ▶ Radius des Kreises: $r = \frac{U_S}{2X_K}$
 - ▶ Abstand Imaginärteil vom Mittelpunkt: $a = \text{Im}(\underline{I}'_R) - r$
 - ▶ Kreis: $r^2 = a^2 + \text{Re}(\underline{I}'_R)^2$

$$\begin{aligned}
 P_{VR} &= m_S \cdot R'_R \cdot I_R'^2 = m_S \cdot R'_R \cdot \left(\text{Re}(\underline{I}'_R)^2 + \text{Im}(\underline{I}'_R)^2 \right) \\
 &= m_S \cdot R'_R \cdot \left(\text{Re}(\underline{I}'_R)^2 + (a + r)^2 \right) \\
 &= m_S \cdot R'_R \cdot \left(\underbrace{\text{Re}(\underline{I}'_R)^2 + a^2}_{r^2} + 2ar + r^2 \right) = m_S \cdot R'_R \cdot (2r^2 + 2ar)
 \end{aligned}$$

Stromortskurve Rotorverluste (3)

$$\begin{aligned}
 P_{VR} &= m_S \cdot R'_R \cdot (2r^2 + 2ar) = m_S \cdot R'_R \cdot (2r^2 + 2(\operatorname{Im}(\underline{I}'_R) - r)r) \\
 &= m_S \cdot R'_R \cdot (2r^2 + 2r\operatorname{Im}(\underline{I}'_R) - 2r^2) = m_S \cdot R'_R \cdot 2r \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}'_R) \\
 &= m_S \cdot R'_R \cdot 2 \frac{U_S}{2X_K} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}'_R)
 \end{aligned}$$

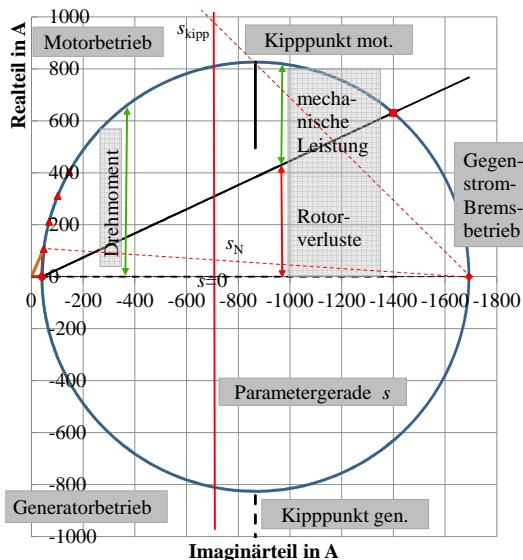
- Rotorverluste sind proportional zum Imaginärteil des Stromes:
 $P_{VR} \sim \operatorname{Im}(\underline{I}'_R)$
- bei $s = 0$ gibt es keine Rotorverluste $P_{VR} = 0$
- bei $s = 1$ sind die Rotorverluste gleich der Luftspaltleistung
 $P_{VR} = P_\delta$

Stromortskurve Rotorverluste (4)

Leistungslinie

- Verbindungslinie zwischen $s = 0$ und $s = 1$ trennt Luftspaltleistung in Rotorverluste und mechanische Leistung
- Leistung unterhalb der Verbindungslinie $s = 0$ und $s = 1$ ist die Rotorverlustleistung P_{VR}
- Leistung zwischen Kreis und der Verbindungslinie $s = 0$ und $s = 1$ ist die mechanische Leistung P_{mech}
- Leistungsmaßstab: $P = m_S \cdot U_S \cdot \operatorname{Re}(\underline{I})$

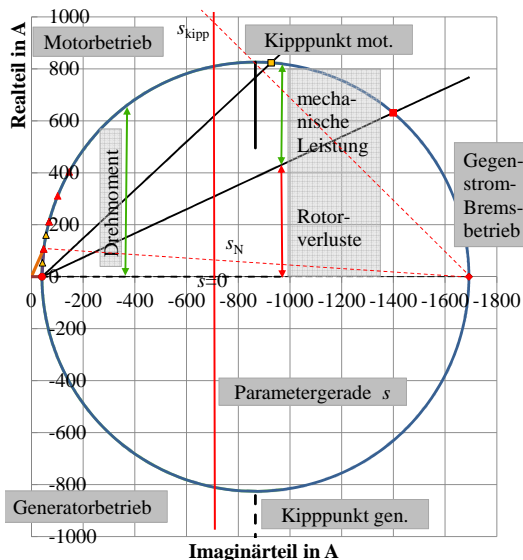
Stromortskurve Beispiel MCA26 (9)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie
- - - Drehmomentlinie
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◆
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
-
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom $I_{rm'}$
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

$$R_s = 0$$

Stromortskurve Beispiel MCA26 (10)



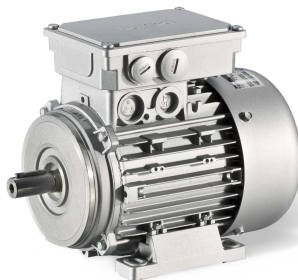
- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie
- - - Drehmomentlinie
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◆
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom $I_{m'}$
- ▲
- ▲ s_n , $2s_n$, $3s_n$, $4s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

$$R_S = 0$$

$$2,0 \cdot R'_R$$

Stromortskurve Beispiel IEC 080 (1)

- Motor IEC 080
- $P_N = 0,75 \text{ kW}$, $n_N = 1410 \frac{1}{\text{min}}$, $U_N = 400 \text{ V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$,
 $I_N = 2,3 \text{ A}$, $s_N = 0,06$
- $R_S = 9,4 \Omega$, $L_S = 413 \text{ mH}$, $L_K = 26,5 \text{ mH}$, $R'_R = 8,74 \Omega$



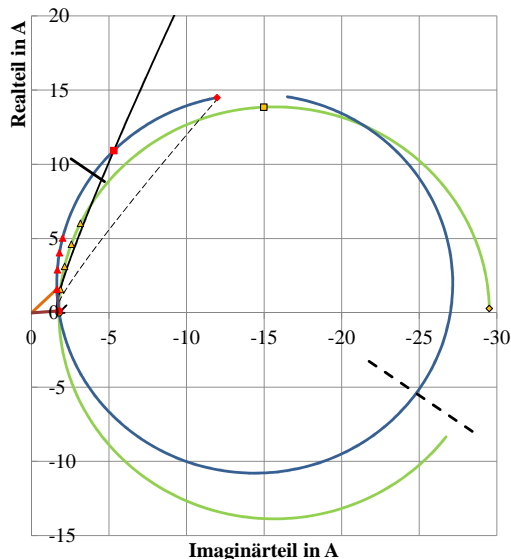
Stromortskurve Beispiel IEC 080 (2)

$$\begin{aligned}
 s = 0 \Rightarrow \underline{I}_S &= \frac{U_S}{R_S + jX_S} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{R_S + j2\pi f_N L_S} \\
 &= \frac{231 \text{ V}}{9,4 \, \Omega + j2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,413 \text{ H}} = (0,128 - j1,77) \text{ A} \\
 s \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{I}_S &= \frac{U_S}{R_S + j\frac{X_S X_K}{X_S + X_K}} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{R_S + j2\pi f_N \frac{L_S L_K}{L_S + L_K}} \\
 &= \frac{231 \text{ V}}{9,4 \, \Omega + j2\pi 50 \text{ Hz} \frac{0,413 \text{ H} \cdot 0,0265 \text{ H}}{0,413 \text{ H} + 0,0265 \text{ H}}} = (14,5 - j12,1) \text{ A}
 \end{aligned}$$

Stromortskurve Beispiel IEC 080 (3)

- → Statorwiderstand und Realteil des Stromes bei $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ nicht vernachlässigbar
- Stromortskurve bleibt Kreis
- Mittelpunkt des Kreises löst sich von Imaginärachse
- Parametergerade ist Parallele zur Tangente in $s \rightarrow \infty$

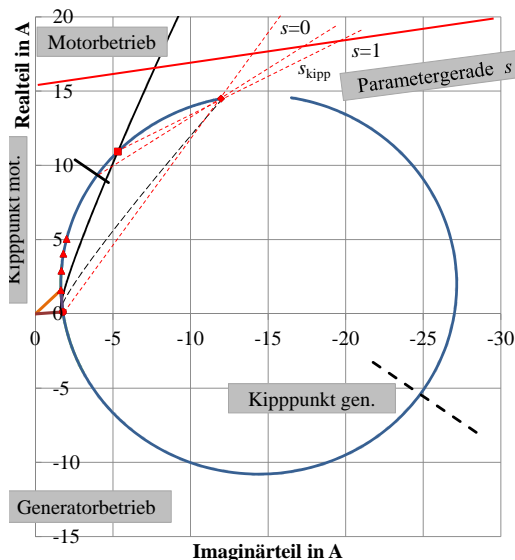
Stromortskurve Beispiel IEC 080 (4)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

$$R_S = 0$$

Stromortskurve Beispiel IEC 080 (5)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

Stromortskurve Statorverluste (1)

- Verluste im Statorwiderstand:

$$P_{VS} = m_S \cdot R_S \cdot I_S^2 \quad (18)$$

Stromortskurve Statorverluste (2)

- Statorverluste aus Kreisform der Stromortskurve mit
 - ▶ Radius des Kreises: r , $r^2 = a^2 + b^2$, Mittelpunkt: $c + jd$
 - ▶ Abstand Imaginärteil vom Mittelpunkt: $a = \text{Im}(\underline{I}_S) - b$
 - ▶ Abstand Realteil vom Mittelpunkt: $b = \text{Re}(\underline{I}_S) - c$

$$\begin{aligned}
 I_S^2 &= \text{Re}(\underline{I}_S)^2 + \text{Im}(\underline{I}_S)^2 = (b + c)^2 + (a + d)^2 \\
 &= b^2 + 2bc + c^2 + a^2 + 2ad + d^2 = r^2 + c^2 + d^2 + 2bc + 2ad \\
 &= r^2 + c^2 + d^2 + 2c \cdot \text{Re}(\underline{I}_S) - 2c^2 + 2d \cdot \text{Im}(\underline{I}_S) - 2d^2 \\
 &= r^2 - c^2 - d^2 + 2c \cdot \text{Re}(\underline{I}_S) + 2d \cdot \text{Im}(\underline{I}_S) \\
 &\approx \underbrace{r^2 - c^2 - d^2}_{\text{konst}} + 2d \cdot \text{Im}(\underline{I}_S)
 \end{aligned}$$

Stromortskurve Statorverluste (3)

Statorverluste in der SOK

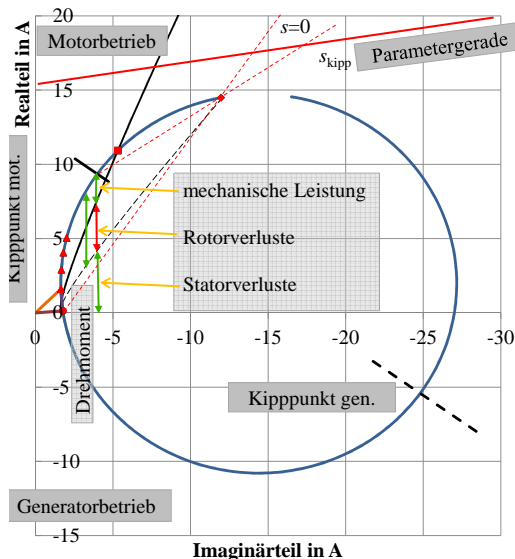
- Statorverluste wachsen linear mit dem Imaginärteil des Statorstromes $P_{VS} \sim \text{Im}(I_{-S})$
- bei $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ ist die aufgenommene Leistung gleich den Statorverlusten
- → die Verbindungslinie zwischen $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ gibt die Statorverluste P_{VS} an.

Stromortskurve Statorverluste (4)

Leistungen in der SOK

- Leistung unterhalb der Verbindungslinie $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ ist die Statorverlustleistung P_{VS}
- Leistung zwischen den Verbindungslinien $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ bzw. $s = 0$ und $s = 1$ ist P_{VR}
- Leistung zwischen Kreis und der Verbindungslinie $s = 0$ und $s = 1$ ist die mechanische Leistung P_{mech}
- Leistungsmaßstab: $P = m_S \cdot U_S \cdot \text{Re}(\underline{I})$

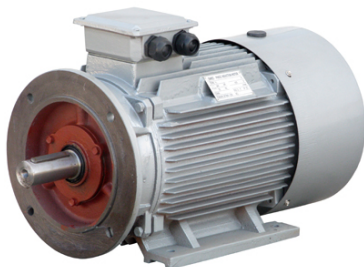
Stromortskurve Beispiel IEC 080 (6)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
-
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

Stromortskurve Beispiel IEC 180 (1)

- Motor IEC 180
- $P_N = 22 \text{ kW}$, $n_N = 1456 \frac{1}{\text{min}}$, $U_N = 400 \text{ V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$,
 $I_N = 38,8 \text{ A}$, $s_N = 0,0293$
- $R_S = 0,20 \Omega$, $L_S = 65,3 \text{ mH}$, $L_K = 1,90 \text{ mH}$, $R'_R = 0,184 \Omega$



Stromortskurve Beispiel IEC 180 (2)

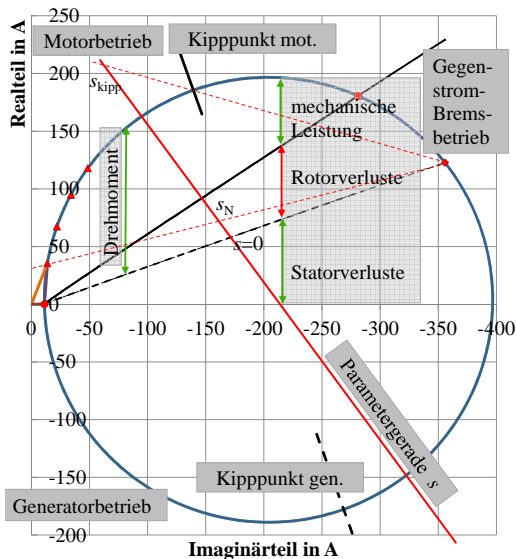
$$s = 0 \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{R_S + jX_S} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{R_S + j2\pi f_N L_S}$$

$$= \frac{231 \text{ V}}{0,20 \, \Omega + j2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,0653 \text{ H}} = (0,11 - j11,26) \text{ A}$$

$$s \rightarrow \infty \Rightarrow \underline{I}_S = \frac{U_S}{R_S + j \frac{X_S X_K}{X_S + X_K}} = \frac{\frac{U_N}{\sqrt{3}}}{R_S + j2\pi f_N \frac{L_S L_K}{L_S + L_K}}$$

$$= \frac{231 \text{ V}}{0,20 \, \Omega + j2\pi 50 \text{ Hz} \frac{0,0653 \text{ H} \cdot 0,00190 \text{ H}}{0,0653 \text{ H} + 0,00190 \text{ H}}} = (122,7 - j355,9) \text{ A}$$

Stromortskurve Beispiel IEC 180 (3)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
-
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

Stromverdrängung im Rotor (2)

- Mit steigender Rotorfrequenz f_R nimmt der Rotorwiderstand R_R bzw. R'_R zu und geht die Rotorinduktivität L_K zurück.
- Nur ein Teil des gesamten Widerstands und der Induktivität ist von der Stromverdrängung betroffen.
- Hier näherungsweise Berechnung für Hochstableiter aus Aluminium.

Stromverdrängung im Rotor (3)

- Anteil mit Stromverdrängung: näherungsweise $k_{SV} \approx 0,5$

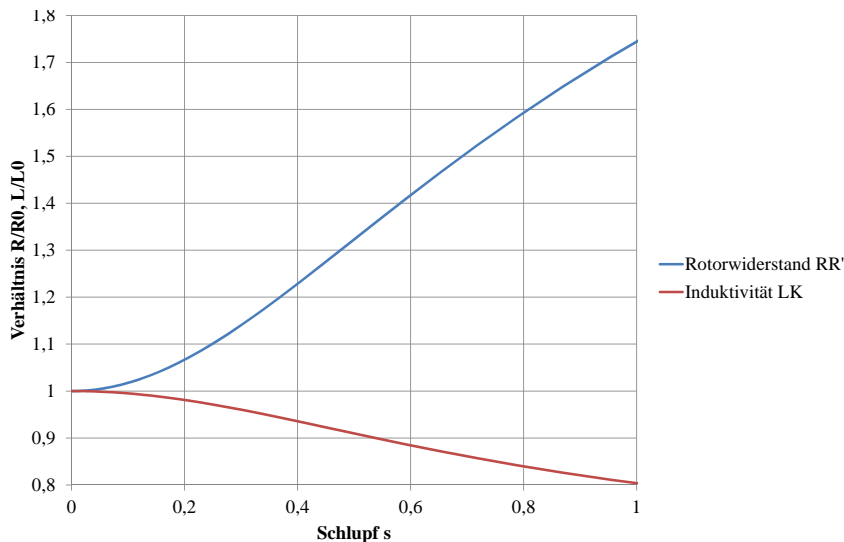
$$R'_{R_{SV}} \approx (1 - k_{SV}) \cdot R'_R + k_{SV} \cdot R'_R \cdot \frac{\sinh 2\zeta + \sin 2\zeta}{\cosh 2\zeta - \cos 2\zeta} \quad (19)$$

$$L_{K_{SV}} \approx (1 - k_{SV}) \cdot L_K + k_{SV} \cdot L_K \cdot \frac{3}{2\zeta} \frac{\sinh 2\zeta - \sin 2\zeta}{\cosh 2\zeta - \cos 2\zeta} \quad (20)$$

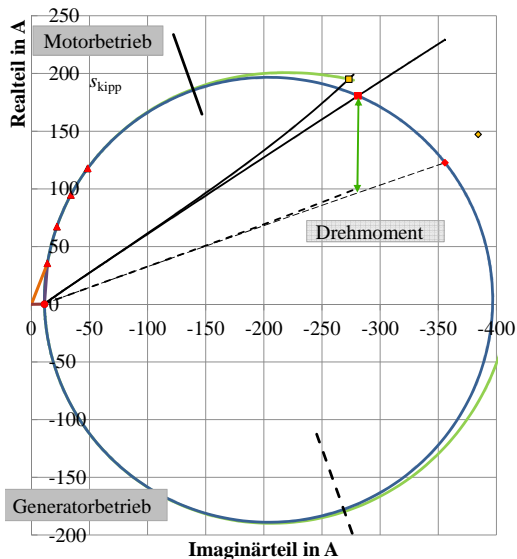
mit

$$\zeta = \alpha \cdot h \quad \text{mit} \quad \alpha = \begin{cases} 83,7 \text{ m}^{-1} \cdot \sqrt{s} & \text{für Aluminium, 50 Hz} \\ 100 \text{ m}^{-1} \cdot \sqrt{s} & \text{für Kupfer, 50 Hz} \end{cases} \quad (21)$$

Stromverdrängung im Rotor - Beispiel IEC 180



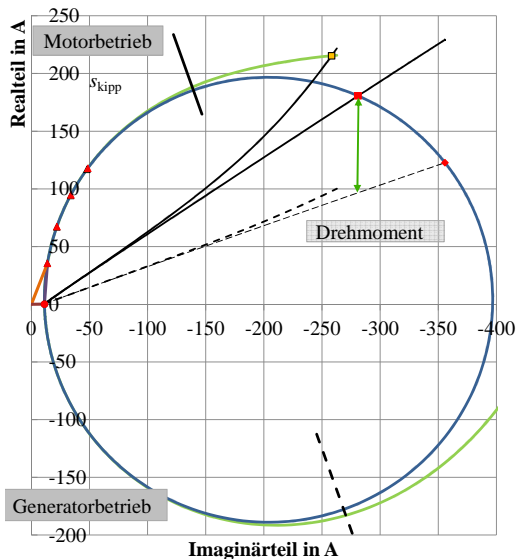
Stromortskurve mit Stromv. IEC 180 (1)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

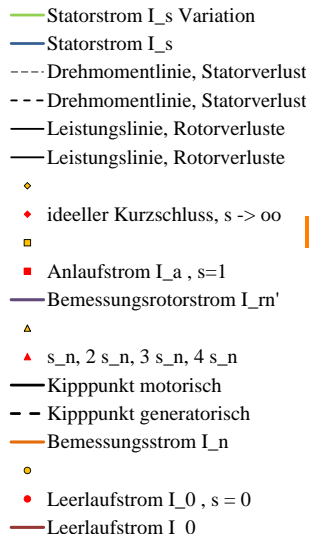
10% SV

Stromortskurve mit Stromv. IEC 180 (2)



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0

25% SV



A set of small navigation icons typically found in Beamer presentations, including symbols for back, forward, search, and other slide controls.

Eisenverluste

Berücksichtigung Eisenverluste

- Berücksichtigung der Eisenverluste näherungsweise durch Eisenverlustwiderstand parallel zur Induktivität L_S .
- Spannung an L_S etwa so groß wie Strangspannung U_S
- → zusätzlicher reeller Strom $I_{fe} = \frac{U_S}{R_{fe}}$, verschiebt die gesamte Stromortskurve nach oben

Reibung

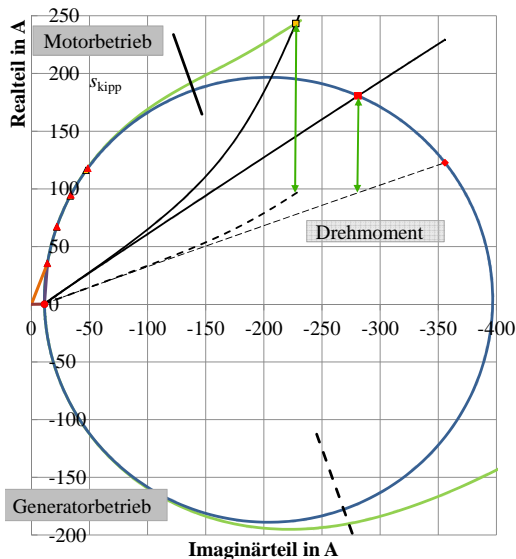
Berücksichtigung Reibmoment

- Reibmoment M_{reib} in etwa konstant
- Berücksichtigung als Parallele oberhalb der Drehmomentlinie zwischen $s = 0$ und $s \rightarrow \infty$ im Abstand des Reibmoments → Reibmomentlinie
- Wellendrehmoment ergibt sich dann aus dem Abstand zwischen Stromortskurve und Reibmomentlinie

Zusammenfassung Stromortskurve (SOK)

- Die SOK beschreibt das Verhalten der Asynchronmaschine für die Ströme \underline{I}_S und \underline{I}'_R in der komplexen Ebene abhängig vom Parameter Schlupf s
- Darstellung Ströme, Leistungen und Drehmoment in einem Diagramm
- Konstante ESB-Elemente \rightarrow SOK ist ein Kreis, lineare Parametergerade, Parallele zur Tangente im Punkt $s \rightarrow \infty$
- Leistungen $P_S, P_{VS}, P_{VR}, P_{\text{mech}} \rightarrow$ Leistungslinien,
 $P = m_S \cdot U_S \cdot \text{Re}(\underline{I})$
- Drehmoment \rightarrow Drehmomentlinie, $M = \frac{p \cdot m_S \cdot U_S}{2 \cdot \pi \cdot f_S} \cdot \text{Re}(\underline{I}_S)$
- Stromverdrängung \rightarrow SOK ist kein Kreis, die Drehmoment- und Leistungslinien sind gekrümmt

Stromortskurve mit Stromv. IEC 180



- Statorstrom I_s Variation
- Statorstrom I_s
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Drehmomentlinie, Statorverlust
- Leistungslinie, Rotorverluste
- Leistungslinie, Rotorverluste
- ◇
- ◆ ideeller Kurzschluss, $s \rightarrow \infty$
-
- Anlaufstrom I_a , $s=1$
- Bemessungsrotorstrom I_{rn}'
- ▲
- ▲ $s_n, 2s_n, 3s_n, 4s_n$
- Kippunkt motorisch
- - Kippunkt generatorisch
- Bemessungsstrom I_n
-
- Leerlaufstrom I_0 , $s=0$
- Leerlaufstrom I_0